

# FLOODING PADA PIPA VERTIKAL DENGAN SISTEM SHARP ENTRANCE; PENGARUH PANJANG PIPA DAN GEOMETRI OUTLET

Mirmanto<sup>1)</sup> and Indarto<sup>2)</sup>

## ABSTRACT

*Flooding is a loss-associated phenomenon that very often occurs in some industrial devices. Generally, some analytical and empirical correlation can not be used directly for predicting flooding. This, therefore, make many of the research so far conducted to become possible solution by its own right. The experimental test section of plexiglas with inside diameter of 24mm and the pipe lengths of 2000 mm, 3000 mm and 3500 mm. In addition, the outlet geometry comprised of sharp, bell-mouth and elbow. Approaching of the real condition in the heat exchanger required flowing down of the liquid by its gravity and flowing upward of gas from the bottom - in opposite direction. If the gas reaches the critical velocity, flooding occurs and usually detected by sharply increases pressure gradient above the liquid inlet.*

*The results of the experiment show that the flooding gas flow rate is lower than in porous wall system. The length effect is not significant. Flooding phenomenon does not always have to start at the bottom or outlet. The results are compared with the previous investigator's results too.*

(Keyword: Flooding, Sharp entrance, Sharp outlet, Bell-mouth outlet, and Elbow outlet.)

## PENGANTAR

*Counter-current flow* aliran gas ke atas dan aliran cairan ke bawah banyak dijumpai pada peralatan-peralatan di industri kimia, industri minyak dan industri pembangkitan daya (misal PWR; *Pressure Water Reactor*). Jika kecepatan aliran gas mencapai nilai kritisnya, maka akan timbul gelombang pada permukaan film cairan yang mana menurut Vassallo (1999) merupakan hasil interaksi antara film cairan dengan aliran udara, yang akhirnya menyebabkan aliran film cairan menjadi turbulen, dan kemudian terjadi *flooding*. *Flooding* perlu dihindari karena akan mengurangi kinerja/efisiensi dari peralatan-peralatan industri tersebut dan bahkan dapat mengakibatkan kerusakan yang fatal. Delhay (1981) berpendapat jika pada peralatan *emergency coolant* di PWR tidak dapat bekerja oleh karena terjadi *flooding*, maka akan timbul *coolant accident*. Sedangkan solusi *flooding* yang berupa korelasi empiris dan analitis, tidak dapat digunakan secara umum, karena itu memperbanyak riset merupakan suatu alternatif yang mungkin untuk dilakukan.

Peneliti *flooding* seperti Hewit dkk (1965), Whalley & McQuillan (1985), Indarto (1993), Indarto & M. Wazis (1995) menyimpulkan bahwa penyebab

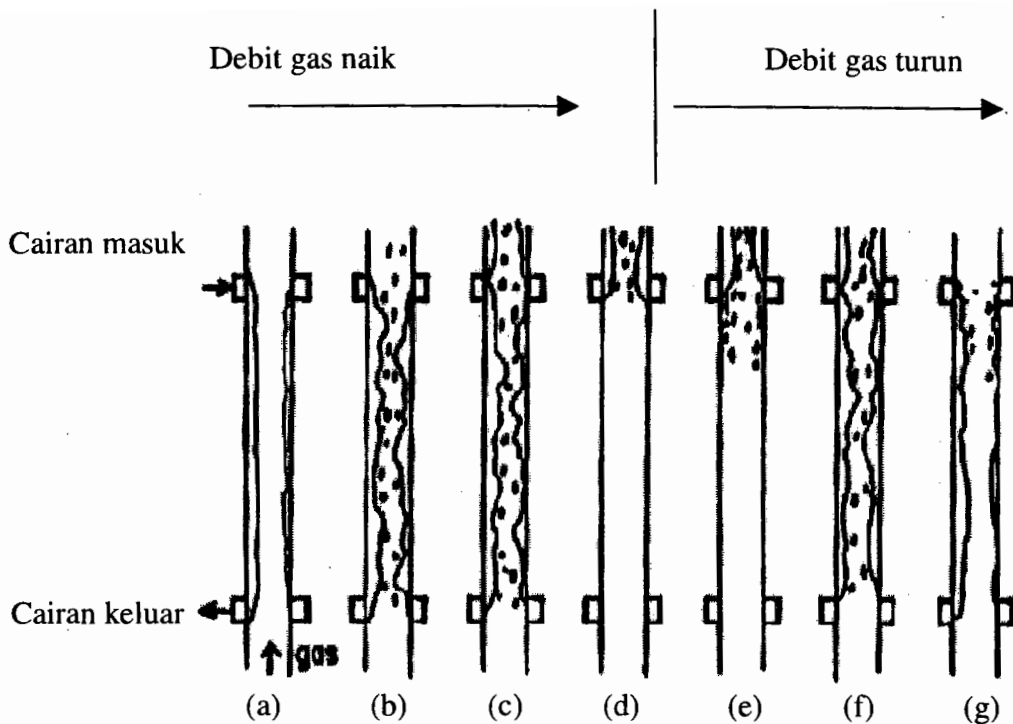
*flooding* sangat kompleks diantaranya adalah sistem inlet dan outlet, panjang/diameter saluran, sifat fisis fluida dan sebagainya. Untuk sistem *porous wall* misalnya, *flooding* terjadi pada kecepatan gas yang lebih besar dari pada sistem bukan *porous wall* dan *flooding* mudah terjadi jika saluran bertambah panjang. Mahmudin (1998) mengemukakan bahwa *flooding* mudah terjadi pada pipa berdiameter kecil dengan debit cairan yang besar. Namun Hewit (1977), Chung dkk (1980), Hewit & Govan (1991) dengan menggunakan sistem pengeluaran bukan *porous wall*, tidak menemukan pengaruh panjang saluran terhadap *flooding*.

### Definisi & Korelasi Flooding:

*Flooding* dapat dijelaskan seperti pada gambar 1. Jika debit udara kecil maka akan terjadi aliran *annular* berlawanan arah (gb.1a). Bila debit udara dinaikkan sedikit demi sedikit, maka akan terbentuk gelombang pada permukaan film cairan dan timbul *droplets* yang terbawa oleh aliran udara. Fenomena ini dinamakan *point of flooding* atau tepat saat dimulainya *flooding* (gb.1b). Dan jika debit udara dinaikkan terus, semua cairan akan terbawa oleh aliran udara ke atas. Fenomena ini disebut *flow reversal* (gb.1d).

<sup>1)</sup> Mirmanto, ST; A Lecturer of Mechanical Engineering, Mataram University, NTB.

<sup>2)</sup> Dr. Ir. Indarto, DEA; A Lecturer of Mechanical Engineering, Post Graduate, Gadjah Mada University, Yogyakarta.



Gambar 1. Fenomena *flooding* & *flow reversal* pada pipa vertikal dengan sistem masukan dan keluaran berupa dinding berpori (*porous wall*).

Wallis (1969) menurunkan persamaan empiris untuk *flooding* sebagai berikut:

$$(J_g^*)^{1/2} + m(J_l^*)^{1/2} = C \quad (1)$$

$$J_k^* = J_k \left( \frac{\rho_k}{gD(\rho_l - \rho_g)} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$J_k = \left[ \frac{Q_k}{\pi D^2 / 4} \right] \quad (3)$$

#### Korelasi analisis:

Korelasi analisis digunakan untuk memprediksi terjadinya *flooding*, pada suatu saluran dengan *theoretical approach* atau pendekatan secara teoritis yang diturunkan dari model analisis.

Model analisis *separate flow* memprediksi *flooding* dengan memperhitungkan gesekan antar muka antara dua fluida dengan menggunakan persamaan momentum, kekekalan massa dan kekekalan energi dalam aliran berlawanan arah *counter current flow*. Korelasi *flooding* untuk model *separate flow* dinyatakan dengan persamaan (4) dan (5).

$$F = \frac{2f_i J_g^{*2}}{\alpha^{5/2}} + \frac{2f_w J_f^{*2}}{(1-\alpha)^2} - (1-\alpha) = 0 \quad (4)$$

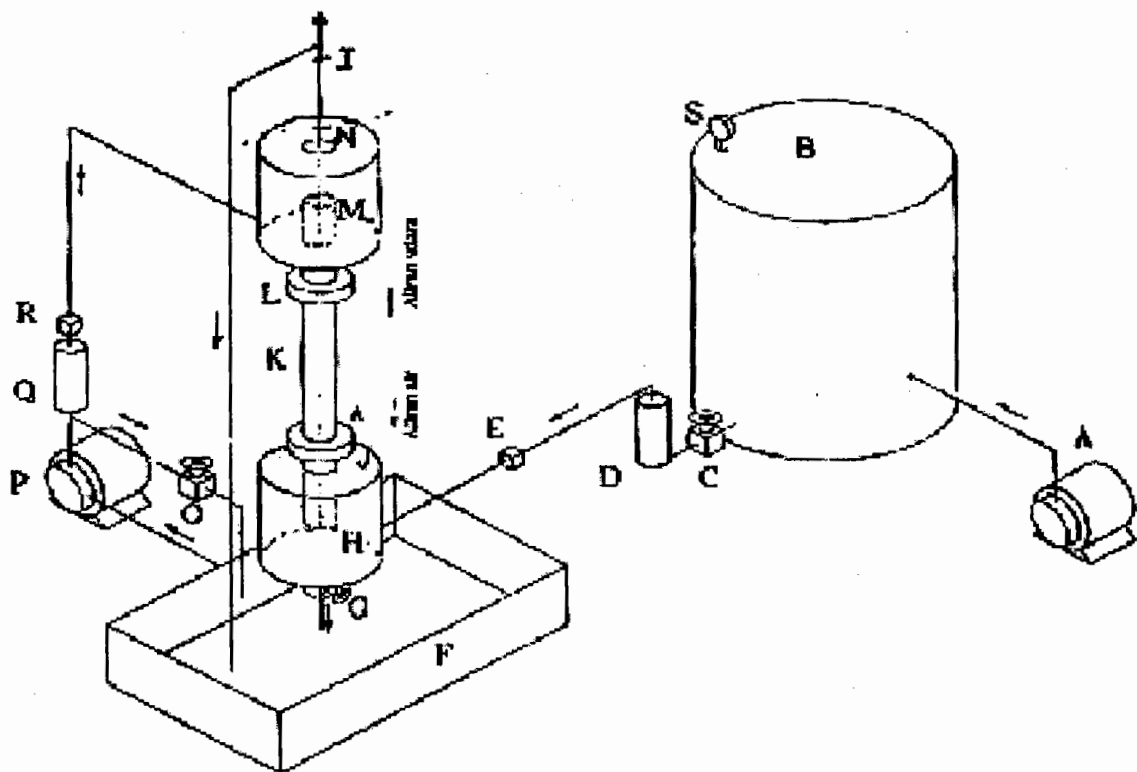
$$G(J_g^*, J_f^*, \alpha) = \frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0 \quad (5)$$

Model *separated cylinder* merupakan model yang paling sederhana untuk membuat korelasi *flooding* secara analitis. Dengan asumsi bahwa cairan dan gas berada pada *cylinder* imajiner secara terpisah, maka korelasi analisis untuk *flooding* dituliskan dengan persamaan (6).

$$J_g^{*2/(n+1)} + J_f^{*2/(n+1)} = 1 \quad (6)$$

#### CARA PENGUKURAN

Instalasi percobaan ditunjukkan pada gb.2. Cairan dimasukkan melalui tabung atas dan secara grafitasi mengalir ke bawah di sepanjang pipa uji. Kemudian udara dimasukkan melalui tabung bawah dan mengalir ke atas berlawanan arah dengan aliran cairan. Jika kecepatan udara mencapai harga kritis, maka akan terjadi *flooding* yang mana ditandai dengan naiknya gradien tekanan di atas *inlet*. Pengukuran gradien tekanan di atas *inlet* menggunakan manometer air dan jarak pengukuran 450mm.



Keterangan: A. Kompresor, B. Tangki udara, C. Katup udara, D. Orifice udara  
 E. Termometer, F. Bak penampung, G. Katup drain, H. Tabung outlet  
 I. Lubang manometer, J. Sambungan transparan, K. Pipa transparan  
 L. Sambungan transparan, M. Tabung inlet, N. Lubang manometer  
 O. Katup bypass, P. Pompa air, Q. Rotameter air, R. Termometer  
 S. Pressure gauge.

Gambar 2. Instalasi alat percobaan; sistem masukan cairan *sharp inlet*, dan sistem keluaran berupa *sharp outlet*, *bell-mouth outlet*, dan *elbow outlet*.

Untuk mendapatkan panjang saluran dan geometri *outlet* yang bervariasi, dilakukan penggantian seksi uji dari panjang 2000 mm, 3000 mm dan 3500 mm dengan diameter pipa 24mm, penggantian *outlet* berbentuk *sharp*, *bellmouth* dan *elbow*. Penelitian dilakukan pada kondisi tekanan atmosfer dan temperatur cairan/udara antara 23°C – 27°C.

#### HASIL PERCOBAAN DAN PEMBAHASAN

Dengan sistem seperti gb. 2, kecepatan gas saat *flooding* lebih rendah jika dibandingkan dengan kecepatan gas pada sistem *porous wall* atau dinding berpori (lihat gambar 4). Grafik hasil penelitian terletak di bawah grafik hasil penelitian para peneliti terdahulu yang menggunakan sistem dinding berpori. Hal ini dikarenakan cairan pada saat masuk ke seksi uji

telah membentuk gangguan berupa tonjolan cairan yang mengakibatkan sebagian cairan mudah terbawa oleh aliran udara (gambar 3). Sehingga pada kondisi yang sama, sistem *sharp inlet* dapat menghasilkan fenomena *flooding* dengan debit udara yang lebih kecil. Oleh karena debit udara kecil, maka nilai C (konstanta Wallis) untuk sistem *sharp inlet* kurang dari 1.

Jika dibandingkan dengan dengan model silinder terpisah ataupun model aliran terpisah (Bankoff G. dkk, 1983) dan model korelasi Wallis, hasil penelitian menyimpang dari model atau korelasi tersebut (lihat gambar 5). Hal ini dikarenakan model-model dan korelasi yang ada tidak mempertimbangkan kondisi masukan (*inlet*) ataupun kondisi keluaran (*outlet*), yang mana pada kenyataan faktor-faktor ini sangat berpengaruh terhadap *flooding*. Model silinder

terpisah dengan nilai  $m=1$  atau korelasi Wallis  $(J_1^*)^{1/2} + (J_g^*)^{1/2} = 1$  bisa dicapai apabila kondisinya sama dan sistem alat eksperimen berupa dinding berpori.

Pengaruh panjang saluran tidak signifikan oleh sebab untuk debit cairan tertentu *flooding* dimulai dari sisi atas (*inlet*). Penyebab *flooding* dimulai dari atas adalah akibat adanya tonjolan cairan pada saat masuk ke seksi uji seperti ditunjukkan oleh gambar 3. Apabila dimulai dari atas, maka panjang seksi uji akan sangat kecil pengaruhnya, namun jika *flooding* dimulai dari bawah, panjang seksi uji akan berpengaruh.

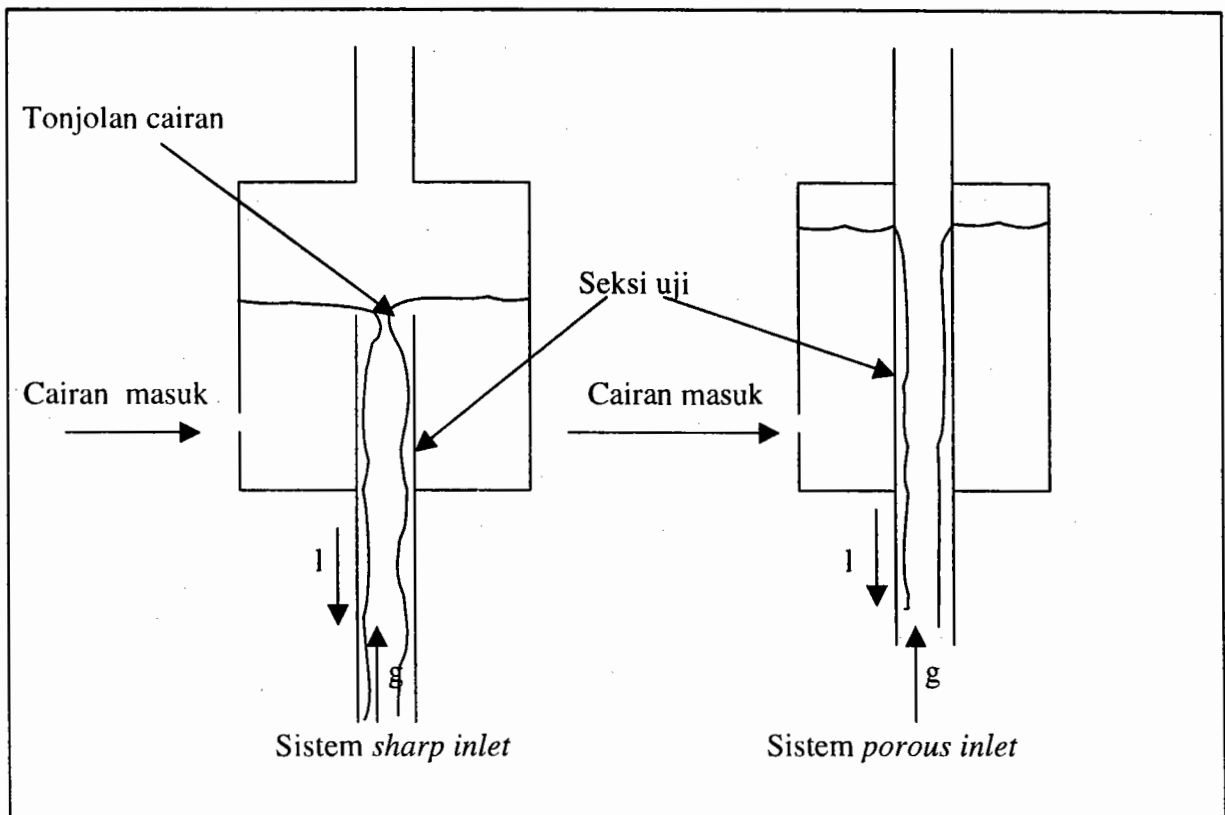
Sedangkan pengaruh bentuk geometri *outlet* sangat signifikan (lihat gb. 6), hal ini dikarenakan semakin halus kondisi *outlet* akan semakin lambat terjadinya *flooding*. *Sharp outlet*, *bell-mouth outlet* dan *elbow outlet* merupakan kondisi *outlet* yang lebih kasar jika dibandingkan dengan sistem dinding berpori, oleh sebab itu dengan kondisi *outlet* yang demikian akan mudah terbentuk fenomena *flooding*. Dari hasil penelitian secara berturut-turut dari yang paling mudah terbentuk *flooding* adalah *outlet* dengan bentuk *sharp*, *bell-mouth* dan yang terakhir bentuk *elbow*. Pengaruh bentuk *outlet* dapat pula ditunjukkan dengan korelasi empiris sebagai berikut;

- Korelasi untuk *Sharp inlet-sharp outlet*  $(J_g^*)^{1/2} + (J_1^*)^{1/2} = 0,77$

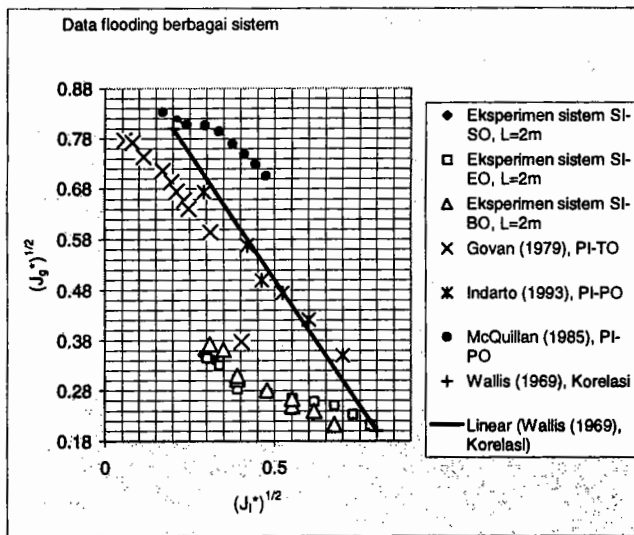
- Korelasi untuk *Sharp inlet-bellmouth outlet*  $(J_g^*)^{1/2} + (J_1^*)^{1/2} = 0,78$
- Korelasi untuk *Sharp inlet-elbow outlet*  $(J_g^*)^{1/2} + (J_1^*)^{1/2} = 0,88$

Semakin tinggi nilai angka di sebelah kanan tanda sama dengan, menunjukkan semakin sulit terbentuk fenomena *flooding* dan begitu sebaliknya. Nilai konstanta Wallis ( $C=1$ ),  $(J_1^*)^{1/2} + (J_g^*)^{1/2} = C = 1$ , menunjukan bahwa terjadinya *flooding* akan lebih lambat atau lebih sukar jika dibandingkan dengan korelasi-korelasi hasil eksperimen tersebut di atas.

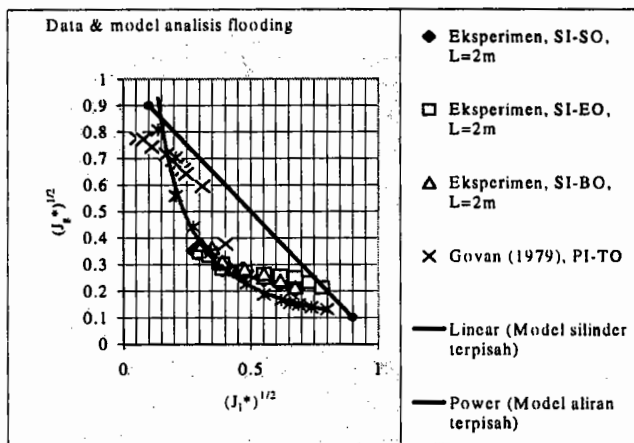
*Pressure drop* di atas tabung *inlet* pada saat sebelum *flooding* dan sesudahnya ditunjukkan dengan gb.7. Sebelum terjadi *flooding* gradien tekanan dapat diabaikan. Kecilnya gradien tekanan tersebut dikarenakan aliran di atas tabung *inlet* masih satu fase (gas). Tepat pada saat *flooding* besaran ini naik secara mendadak. Semakin besar debit cairan yang dimasukkan, kenaikan gradien tekanan semakin besar pula. Fenomena ini disebabkan pada saluran di atas *inlet* jika cairan yang dimasukkan besar, akan semakin banyak dialiri oleh cairan yang mana densitas rata-rata (cairan-udara) menjadi besar pula. Dengan densitas rata-rata besar, akan mengakibatkan gradien tekanan menjadi besar.



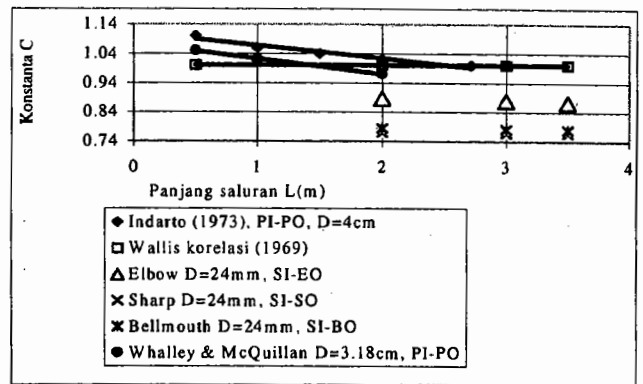
Gambar 3. Fenomena di daerah *inlet* untuk sistem *sharp inlet* dan sistem *porous inlet*.



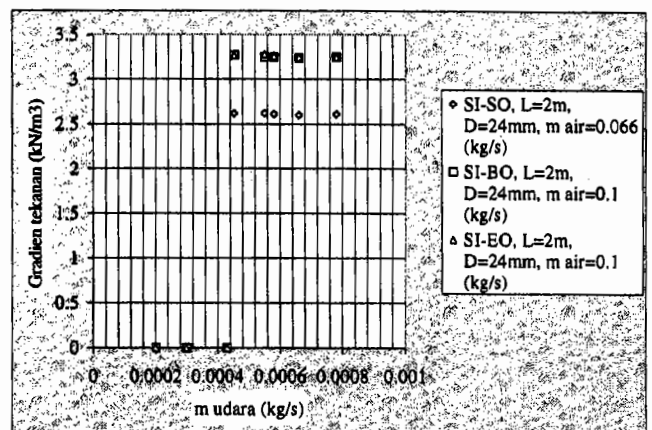
Gambar 4. Hasil pengukuran kecepatan gas *flooding* pada eksperimen dan hasil para peneliti terdahulu. PI; *porous inlet*, PO; *porous outlet*, SI; *sharp inlet*, SO; *sharp outlet*, TO; *tapered outlet*, BO; *bellmouth outlet*, EO; *elbow outlet*.



Gambar 5. Hasil pengukuran  $J_l^*$  dan  $J_g^*$  pada penelitian dan korelasi / model-model analisa *flooding*. SI: *sharp inlet*, SO: *sharp outlet*, PI; *porous inlet*, PO; *porous outlet*, TO; *tapered outlet*.



Gambar 6. Pengaruh panjang saluran terhadap konstanta C (Wallis, 1969) dan pengaruh geometri outlet, serta hasil eksperimen dan para peneliti terdahulu.



Gambar 7. Gradien tekanan di atas sisi *inlet* untuk beberapa *mass flow rate* cairan.

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian didapatkan bahwa sistem seperti gambar 2, menghasilkan kecepatan gas saat *flooding* lebih rendah dari pada sistem dinding berpori, pengaruh panjang saluran tidak signifikan, pengaruh geometri outlet signifikan dan *flooding* tidak selalu dimulai dari bawah kecuali untuk debit cairan kecil (<3 lpm). Terjadinya *flooding* selalu ditandai dengan kenaikan gradien tekanan di atas *inlet* dengan tajam.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada PAU-IT UGM atas kesempatan penulis melakukan penelitian di Lab. HMT, dan mengucapkan banyak terima kasih kepada Ir. Purnomo, MSME. Ph.D. sebagai *reviewer*, serta kepada semua orang yang telah membantu penulis dalam melakukan penelitian dan penyusunan naskah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bankoff G. & Sang Chun Lee, Februari 1983, 'A critical review of the flooding literature', Department of Chemical Engineering, North Western University, Evanston Illinois 602201.
- Chung, Liu & Tien, 1980, 'Flooding in two-phase counter-current flows II', Paper, Pergamon Press, Northern, Irland.
- Delhaye J.M dkk, 1981, 'Thermohydraulic of two-phase system for industrial design and nuclear engineering', McGrawHill Book Company, New York, USA.
- Hewit dkk, 1965, 'Transition in film flow in a vertical tube', AERE R4614.
- Hewit, GF, 1977, 'Influence of end condition, tube inclination and fluid physical properties in gas-liquid flows', Report HTFS RS222.
- Hewit & Govan AH, 1991, 'Flooding & churn flow in vertical pipes', Paper, Pergamon Press, England.
- Indarto, 1993, 'Pengaruh panjang saluran terhadap kecepatan gas pada fenomena flooding', Media Teknik, no. 1 tahun XV, April 1993 No. ISSN 0216-3012.
- Indarto & M. Wazis, 1995, 'Pengaruh injektor gas pada flooding di dalam saluran berdiameter kecil', Media Teknik, no. 1 tahun XVII, April 1995 No. ISSN 0216-3012.
- Mahmudin, 1998, 'Karakteristik aliran dua fase (gas-air) berlawanan arah vertikal dalam saluran berdiameter kecil', T. Mesin, Ilmu-Ilmu Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- McQuillan & Whalley & Hewit, 1985, 'Flooding in vertical two-phase flow', Paper, Pergamon Press, England.
- Vassallo P., 1999, 'Near wall structure in vertical air-water annular flows', International Journal of Multiphase Flow 25, 459-476, Pergamon Press.
- Wallis G. B, 1969, 'One-dimensional two-phase flow', McGrawHill Book Inc., USA.
- Whalley & McQuillan, 1985, 'Flooding in two-phase flow: the effect of tube length and artificial wave injection', Paper, Pergamon Press, England.

## Notasi :

- C : konstanta Wallis.
- D : diameter saluran (m)
- $f_l$  : koef. gesekan interfisial ( $0,005+14.6(1-\alpha)^{1.87}$ ).
- $f_w$  : koefisien gesekan dinding ( $0,079 Re^{-0.25}$ ).
- g : percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ).
- $J_g, J_l$  : kecepatan superfisial gas dan cair (m/s) yang dinyatakan oleh persamaan:
- $J_g^*, J_l^*$  : kecepatan superfisial tak berdimensi dari fase gas dan cair.
- k : g(gas) atau l(cair)
- m : parameter yang harganya tergantung pada sifat-sifat fisis cairan dan gas.
- n : konstanta dari 2,5 – 3,5.
- $Q_k$  : debit gas atau cairan ( $m^3/s$ )
- $\rho$  : rapat massa ( $kg/m^3$ )
- Re : bilangan Renold.
- $\alpha$  : fraksi hampa.

# ANALISIS PENGARUH PROSES PEMBENTUKAN TERHADAP SIFAT FISIS DAN MEKANIS BAHAN PERUNGGU KERAS

Tjokorda Gde Tirta Nindhia<sup>1</sup> dan Jamasri<sup>2</sup>

## ABSTRACT

*Hard bronze is a metal alloy composing of 15%-20% tin (Sn) and 80%-85% copper (Cu). In manufacturing processes made of this alloy, it always undergoes forging and annealing processes. This research investigated the effect of manufacturing processes including press forging and annealing on the physical and mechanical properties.*

*These alloys were prepared with casting processes and continued with a press forging on two temperature variations namely 700°C and 800°C, with three variations of press forging reductions, those were 10%, 20%, and 30% of each. Annealing processes were done on three temperature variations those are 400°C, 550°C, and 600°C to the press forging production with reduction 20% and then were performed the tensile, hardness, and impact tests. The observation on microstructures were done to know the changing of microstructures that happened during manufacturing processes*

*The test results show that the increase of the reduction of press forging tends to increase the tensile strength and hardness, but decrease the impact strength. Increasing the annealing temperature tends to decrease tensile strength and hardness, but increase the impact strength. The observation on microstructures show that the length of crystal grain increases significantly with the increase of the press forging reduction. The increase of annealing temperature causes decreasing the length of crystal grain.*

**Keywords:** Hard bronze; press forging; annealing; tensile strength, hardness

## PENDAHULUAN

Perunggu keras merupakan logam paduan dengan komposisi 15%-20% timah putih (Sn), dan 80%-85% tembaga (Cu), (Eshbach, 1952), Paduan ini dikenal sebagai logam yang memiliki kekerasan, ketahanan aus dan ketahanan korosi yang baik. Paduan ini dalam proses pembentukannya, selalu mengalami proses penempaan dan proses anil (Mendenhall, 1977). Perunggu keras sebenarnya tidak banyak digunakan dalam konstruksi karena sifat rapuhnya, hanya pada komponen-komponen yang menuntut kekerasan dan ketahanan korosi yang tinggi. Paduan ini justru banyak digunakan untuk pembuatan alat musik tradisional karena suara yang dihasilkan tidak mudah berubah karena kekerasannya.

Penelitian ini bertujuan membahas pengaruh proses pembentukan yang meliputi proses anil dan proses penempaan tekan (*press forging*) terhadap sifat fisis dan mekanis bahan perunggu keras ini. Proses penempaan tekan dipilih karena proses ini memiliki ketelitian yang lebih baik dari proses tempa lainnya.

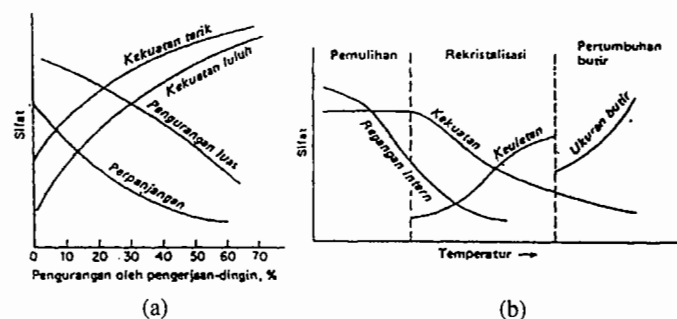
## LANDASAN TEORI

Penempaan adalah proses pengerjaan logam melalui deformasi plastis menjadi bentuk yang berguna dengan menggunakan palu (*drop forging*) atau penekan (*press forging*). Ada 2 kelompok utama peralatan yang digunakan pada proses penempaan yaitu palu tempa yang memberikan tumbukan cepat

ke permukaan logam dan penempaan tekan dengan menekan permukaan logam secara perlahan.

Keuntungan penggunaan penempaan palu adalah mesin penempa jenis ini lebih murah, tidak diperlukan beban besar dalam pengoperasiannya, tetapi ketelitian dari mesin jenis ini kurang baik jika dibandingkan dengan proses penempaan tekan (Dieter, 1986) dan (Amstead dkk, 1979). Disamping itu penggunaan penempaan tekan memberi distribusi tegangan lebih merata pada semua bagian jika dibandingkan dengan penggunaan teknik *drop forging* (Pollack, 1979).

Perubahan sifat mekanik akibat proses penempaan dapat diamati pada gambar 1.a, peningkatan reduksi penempaan akan menyebabkan peningkatan kekuatan tarik dan kekuatan luluh, tetapi perpanjangan mengalami penurunan (Dieter, 1986).



Gambar 1. (a) Pengaruh penempaan terhadap sifat mekanik bahan

(b) Pengaruh proses anil terhadap sifat mekanik bahan.

<sup>1</sup> Ir. Tjokorda Gde Tirta Nindhia, M.T., Dosen PS Teknik Mesin, Universitas Udayana, Bali

<sup>2</sup> Ir. Jamasri, Ph.D., Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta



Sekalipun struktur sel akibat proses penempaan atau pembentukan plastis stabil secara mekanis namun secara termodinamis struktur sel ini tidak stabil. Dengan meningkatnya temperatur keadaan menjadi semakin tidak mantap yang pada akhirnya logam menjadi lunak dan kembali ke posisi bebas regangan. Proses ini disebut sebagai proses pelunakan (*annealing*). Proses anil dapat dibagi dalam 3 proses yaitu pemulihan, rekristalisasi, pertumbuhan butir (Avner, 1974). Perubahan sifat mekanik yang menyertai setiap tahap dalam proses anil tersebut dapat dilihat pada gambar 1.b.

Untuk material perunggu komersial yang telah mengalami pembentukan plastis, proses anil menyebabkan penurunan kekuatan luluh dan kekuatan tarik. Sedangkan peningkatan rasio pengerjaan plastis menyebabkan peningkatan kekerasan, kekuatan luluh, tegangan tarik maksimum dan penurunan perpanjangan (Han dkk, 1997).

## METODE PENELITIAN

Paduan disiapkan melalui proses pengecoran dengan bahan cetakan terbuat dari pasir silika dengan pengikat dari Natrium silikat yang dikeraskan dengan hembusan gas CO<sub>2</sub>. Teknik pengecoran ini dipilih karena memberikan hasil yang baik untuk produk coran yang tipis (Surdia dan Chijiwa, 1986).

Selanjutnya proses penempaan tekan dilakukan pada dua temperatur berbeda, yaitu 700°C dan 800°C dan pada masing-masing suhu dilakukan 3 variasi reduksi penempaan yaitu: 10%, 20%, 30%. Proses anil dilakukan untuk produk penempaan tekan dengan reduksi 20% pada temperatur anil 400°C, 550°C dan 600°C. Kemudian dilakukan pengujian tarik dengan dimensi spesimen didasarkan atas standar JIS 2201

no. 5 dengan tebal 2mm, pengujian kekuatan impak *Charpy* dengan dimensi spesimen didasarkan atas standar JIS 2202 no. 4 dengan tebal 2mm dan pengujian kekerasan dengan skala kekerasan Rockwell C pada beban 980N. Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui perubahan yang terjadi akibat proses pembentukan tersebut.

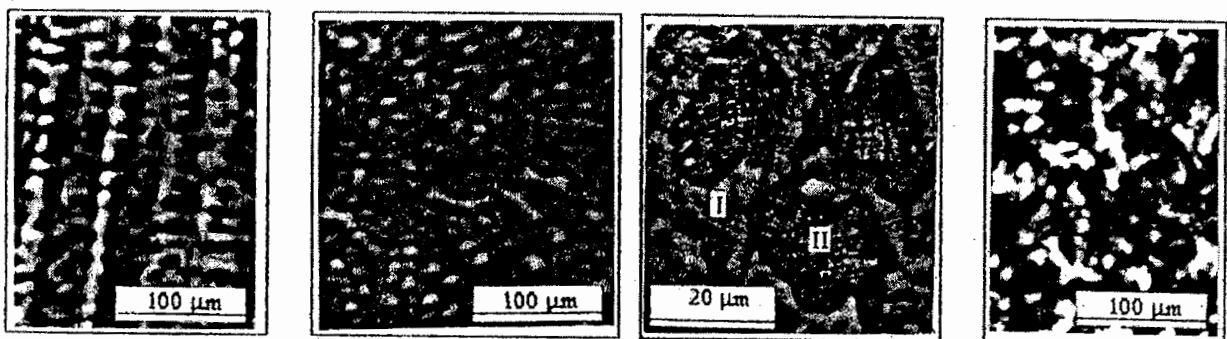
## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Struktur Mikro

Struktur mikro tembaga dan timah putih dapat dilihat pada gambar 2.a dan gambar 2.c. Sedangkan struktur mikro bahan dasar perunggu keras dapat diamati pada gambar 2.b. Terlihat bahwa paduan terdiri dari 2 fase yaitu matrik  $\alpha$  dan fase Cu<sub>3</sub>Sn.

Proses penempaan tekan pada temperatur 700°C terhadap bahan dasar (gambar 2.b), menyebabkan terjadinya pertambahan panjang kristal Cu<sub>3</sub>Sn (gambar 3.a dan gambar 3.b). Dengan semakin meningkatnya reduksi penempaan, keseluruhan kristal Cu<sub>3</sub>Sn menjadi panjang secara merata, seperti tampak pada gambar 3.c.

Selanjutnya proses anil dilakukan pada produk tempa 700°C dengan reduksi 20% (struktur mikro gambar 3.b). Perubahan yang terjadi seperti tampak pada gambar 4. Gambar 4.a memperlihatkan bahwa proses anil pada temperatur 400°C mencapai tahap pemulihan (*recovery*), dengan tidak adanya perubahan struktur mikro yang terjadi jika dibandingkan dengan struktur mikro sebelum dianil (gambar 3.b), pada proses ini terjadi pelepasan tegangan sisa akibat proses penempaan tekan.



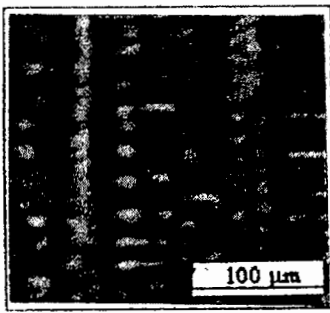
(a) Tembaga

(b) Perunggu keras, I = Matrik  $\alpha$ , II = Fase Cu<sub>3</sub>Sn

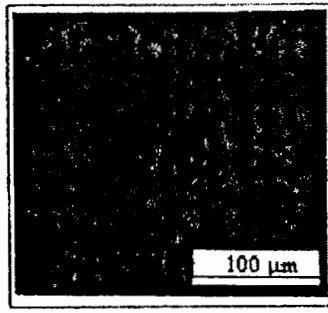
(c) Timah putih

Gambar 2. Struktur mikro (a) Tembaga. (b) Perunggu keras. (c) Timah putih

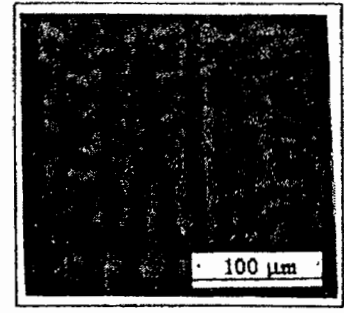




(a) Reduksi 10%

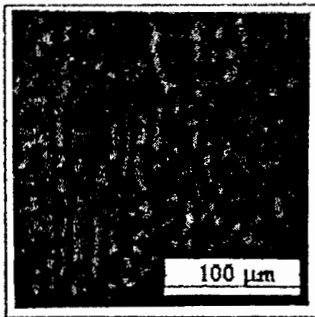


(b) Reduksi 20%

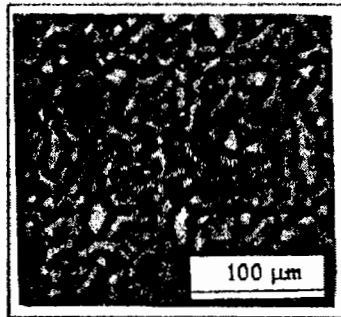


(c) Reduksi 30%

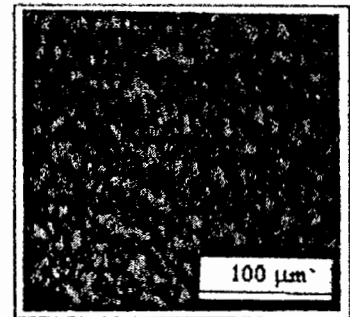
Gambar 3. Perubahan struktur mikro perunggu keras akibat penempaan tekan pada temperatur 700°C dengan bahan etsa  $\text{HNO}_3$



(a) Anil 400°C *Recovery*



(b) Anil 550°C *Recrystallization*



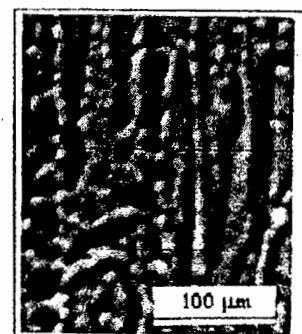
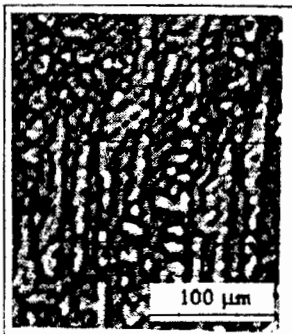
(c) Anil 600°C *Complete recrystallization*

Gambar 4. Perubahan struktur mikro produk tempa 700°C, red. 20% akibat proses anil dengan bahan etsa  $\text{HNO}_3$

Proses anil pada temperatur 550°C mencapai tahap rekristalisasi yang ditandai dengan berkurangnya bagian bagian fase  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  yang panjang dan terbentuknya kembali fase  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  dengan ukuran lebih pendek melalui proses rekristalisasi (gambar 4.b). Selanjutnya proses anil pada temperatur 600°C pada produk ini mencapai tahap rekristalisasi

sempurna, ditandai dengan berubahnya keseluruhan fase  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  menjadi butir-butir kecil secara merata seperti terlihat pada gambar 4.c.

Perubahan struktur mikro akibat proses penempaan tekan pada temperatur 800°C terhadap bahan dasar (gambar 2.b) terlihat pada gambar 5.



(a) Reduksi 10% (b) Reduksi 20% (c) Reduksi 30%

Gambar 5. Perubahan struktur mikro bahan dasar akibat proses tempa tekan pada temperatur 800°C dengan bahan etsa  $\text{HNO}_3$

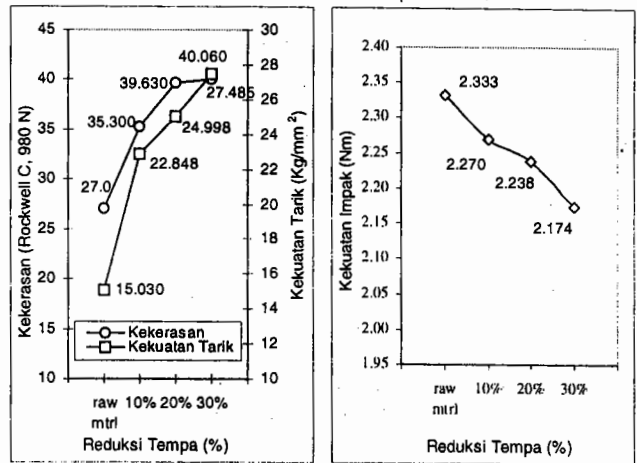
Pada penempaan dengan reduksi yang rendah, beberapa bagian fase  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  telah bertambah panjang tetapi belum merata seperti tampak pada gambar 5.a. Pada penempaan dengan reduksi 20% seperti tampak pada gambar 5.b, ternyata fase  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  telah menjadi panjang secara merata. Peningkatan reduksi penempaan mencapai reduksi 30% menyebabkan fase  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  yang satu dengan lainnya terangkai seperti tampak pada gambar 5.c.

Produk penempaan tekan pada temperatur  $800^\circ\text{C}$  dengan reduksi 20% (gambar 5.b), selanjutnya dianil dengan variasi temperatur:  $400^\circ\text{C}$ ,  $550^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$ , dengan perubahan struktur mikro seperti tampak pada gambar 6. Proses anil pada temperatur  $400^\circ\text{C}$  juga mencapai tahap pemulihan yang ditandai dengan masih ada beberapa bagian  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  yang panjang seperti tampak pada gambar 6.a. Peningkatan temperatur anil sampai temperatur  $550^\circ\text{C}$  mencapai tahap rekristalisasi dengan ditandai dengan bertambahnya jumlah fase  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  yang telah berubah menjadi butir butir kecil melalui proses rekristalisasi seperti tampak pada gambar 6.c. Proses anil pada temperatur  $600^\circ\text{C}$  ternyata telah mencapai tahap pertumbuhan butir yang ditandai dengan terdapatnya butir butir dengan ukuran besar seperti terlihat pada gambar 6.c.

#### Sifat Mekanik

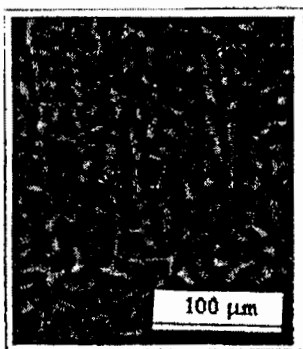
Hasil pengujian kekuatan tarik, kekerasan dan kekuatan impact pada produk penempaan tekan pada temperatur  $700^\circ\text{C}$  dapat dilihat pada gambar 7. Data menunjukkan dengan peningkatan reduksi penempaan

tekan menyebabkan terjadinya peningkatan kekuatan tarik dan kekerasan, tetapi kekuatan impact mengalami penurunan.

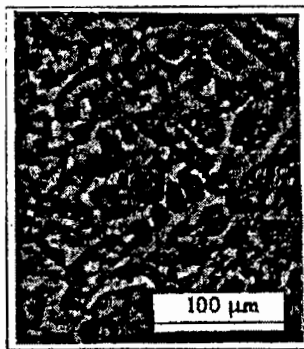


Gambar 7. Grafik pengaruh penempaan tekan pada temperatur  $700^\circ\text{C}$  terhadap kekuatan tarik, kekerasan dan kekuatan impact bahan perunggu keras

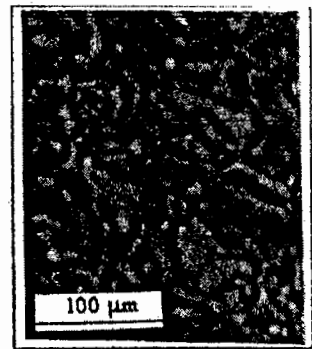
Selanjutnya pada produk tempa tekan pada temperatur  $700^\circ\text{C}$  dengan reduksi 20% dilakukan proses anil dengan perubahan sifat mekanik seperti tampak pada gambar 8. Terlihat bahwa dengan peningkatan temperatur anil, kekuatan tarik dan kekerasan mengalami penurunan sedangkan kekuatan impact bahan mengalami peningkatan.



(a) Anil  $400^\circ\text{C}$  Recovery

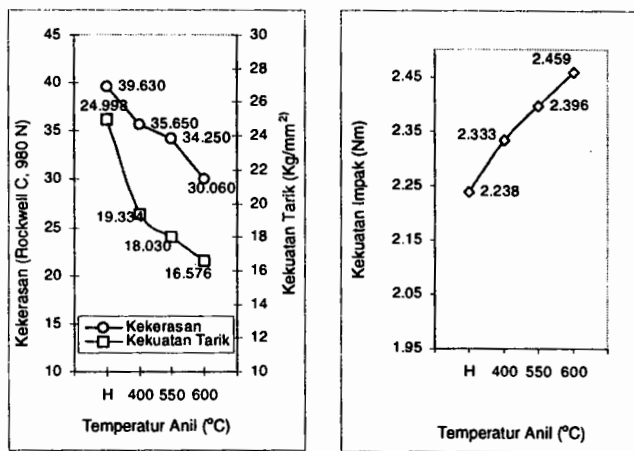


(b) Anil  $550^\circ\text{C}$  Recrystallization



(c) Anil  $600^\circ\text{C}$  Grain growth

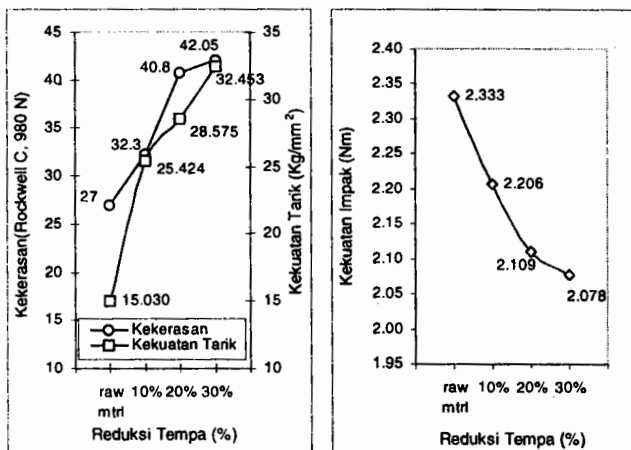
Gambar 6. Perubahan struktur mikro produk tempa tekan  $800^\circ\text{C}$  pada reduksi 20% akibat proses anil dengan bahan etsa  $\text{HNO}_3$ .



H= Produk tempa 700°C, reduksi 20%

Gambar 8. Grafik pengaruh anil pada produk tempa tekan 700°C, red 20% terhadap kekuatan tarik, kekerasan, dan kekuatan impact.

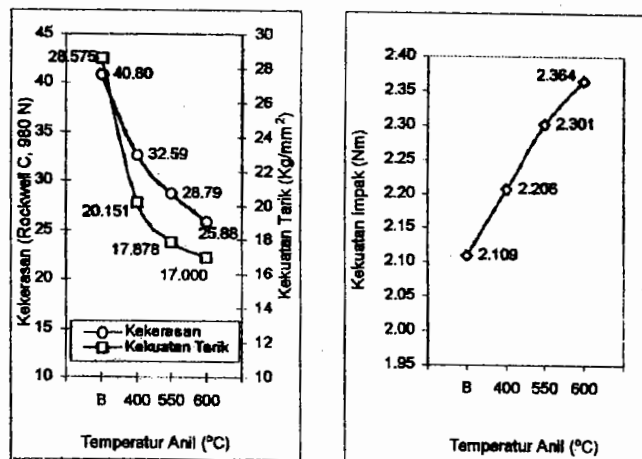
Perubahan sifat mekanik yang terjadi akibat proses penempaan tekan pada temperatur 800°C ditunjukkan pada gambar 9. Terlihat dengan peningkatan reduksi penempaan menyebabkan terjadinya peningkatan kekerasan yang disertai dengan peningkatan kekuatan tarik, namun kekuatan impact mengalami penurunan.



Gambar 9. Grafik pengaruh penempaan tekan pada temperatur 800°C terhadap kekuatan tarik, kekerasan dan kekuatan impact perunggu keras

Proses anil selanjutnya dilakukan pada produk penempaan tekan pada temperatur 800°C dengan reduksi 20%. Perubahan sifat mekanik yang terjadi ditunjukkan pada gambar 10. Peningkatan temperatur anil ternyata mengakibatkan penurunan kekerasan yang diikuti oleh penurunan kekuatan tarik, tetapi terjadi peningkatan kekuatan impact. Jika pada proses anil 600°C pada produk penempaan tekan

700°C, reduksi 20% mencapai fase rekristalisasi sempurna, proses anil pada temperatur 600°C untuk produk tempa 800°C, reduksi 20% telah mencapai fase pertumbuhan butir (*grain growth*), yaitu terjadinya perbesaran butir.



Gambar 10. Grafik pengaruh anil pada produk tempa tekan 800°C, red 20% terhadap kekuatan tarik, kekerasan, dan kekuatan impact

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Proses penempaan tekan menyebabkan terjadinya perpanjangan butir kristal  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Peningkatan reduksi penempaan tekan akan memperbanyak kristal  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  yang mengalami perpanjangan. Keseluruhan kristal  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  sudah menjadi panjang secara merata pada penempaan tekan dengan reduksi 30%. Perubahan struktur mikro akibat penempaan tekan ini menyebabkan peningkatan dan kekuatan tarik, namun terjadi penurunan kekuatan impact.
2. Proses anil pada produk penempaan tekan pada bahan perunggu keras menyebabkan terjadinya penurunan kekerasan dan kekuatan tarik, tetapi menguatkan kekuatan impact. Proses anil menyebabkan fase  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  yang sebelumnya panjang akibat proses penempaan tekan, berangsur-angsur menjadi pendek kembali melalui proses rekristalisasi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Tambang Timah Bangka atas bantuan material penelitian dan R.v.G. van Deventer-Maas atas bantuan biaya penelitian yang telah diberikan. Terima kasih juga penulis sampaikan pada

Ketua Laboratorium Bahan Teknik Jurusan Teknik Mesin beserta para staf dan teknisi atas segala bantuannya, sehingga penelitian ini dapat terselesaikan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Amstead, B. H., Ostwald, Phillip F., Begemean, Myron L., 1979, *Manufacturing Processes*, John Wiley&Sons, New York.
- Avner, Sidney H., 1974, *Introduction to Physical Metallurgy*, McGraw-Hill, Singapore.
- Dieter, George E., 1986, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, USA
- Eshbach, Ovid W., 1952, *Handbook of Engineering Fundamentals*, John Wiley & sons, New York.
- Han, J. M., Han, Y. S., dan You, S.Y., 1997, *Mechanical Behavior of A New Dispersion-Strengthened Bronze*, Journal of Material Science, Vol. 32, halaman 6613-6618.
- Hoyt, Samuel L., 1939, *Constitution of Copper-Tin Alloys*, Metal Handbook, halaman 1364-1366.
- Japan Standards Association, 1973, *JIS Handbook Non ferrous Metal and Metallurgy*, JSA, Japan.
- Mendenhall, J. Howard, 1977, *Understanding Copper Alloys*, John Wiley & Sons, New York.
- Pollack, Herman W., 1979, *Manufacturing and Machine Tool Operations*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Surdia, Tata, Chijiwa, Kenji. 1986, *Teknik Pengecoran Logam*, Pradnya Paramita, Jakarta.